МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 + 621.2.082.18 DOI 10.12737/20216

Износостойкость высокоэнтропийных инструментальных режущих материалов*

А. А. Рыжкин[1], А. И. Боков[2], Ю. А. Олейникова[3]**

[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Wear-resistance of high entropy cutting-tool materials***

A. A. Ryzhkin[1], A. I. Bokov[2], Y. A. Oleynikova[3]**

[1, 2, 3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы — изучение износостойкости экспериментальных твердых сплавов (ЭТС) и сложнолегированных быстрорежущих сталей (БРС) при резании, а также установление связи между их трибологическими характеристиками и величиной энтропий (термо-ЭДС). Экспериментальные исследования износа ЭТС проводили при продольном точении, а БРС — в условиях трения и на операциях сверления. В кобальтовую связку вводились однокарбидные сплавы молибдена, железа, титана и меди. Показано, что в этом случае по сравнению с базовым сплавом ВК8 возрастают и энтропия, и износостойкость (до 2,5–3 раз). Одновременно расширяется диапазон оптимальных скоростей резания. Установлена функциональная связь между энтропией и термо-ЭДС БРС и показано, что минимальным значениям термо-ЭДС соответствуют большие значения энтропии. Интенсивность изнашивания БРС при трении ниже, а гарантийная стойкость сверл выше у сталей с большим значением энтропий. Полученные результаты целесообразно использовать на операциях формообразования для режущего материала (РМ) максимальной износостойкости, а также при разработке новых РМ.

The work objective is to study the wear resistance of the experimental hard alloys (EHA) and complex alloyed high-speed steels (HSS) under cutting, as well as to establish the interconnection between their tribological characteristics and the entropy values (thermal EMF). The experimental studies on the EHA wear are carried out under the longitudinal turning, and HSS – under the friction conditions and drilling operations. Molybdenum, iron, titanium and copper mono carbide alloys are inserted into the cobalt bonds. It is shown that in this case, both entropy and wear-resistance increase (up to 2.5-3 times) as compared to the VK8 base alloy. At the same time the optimum machining spectrum extends. The functional relation between entropy and thermal EMF of the HSS is established, and it is shown that the minimum values of the thermal EMF correspond to the high entropy values. The HSS wear rate under friction is lower and the guaranteed life of drills is higher in steels with a high entropy value. The results obtained should be applied to the forming operations for the cutting-tool materials (CTM) of the maximum wear-resistance, and when developing new CTM.

Ключевые слова: режущие материалы, износостойкость, термо-ЭДС, энтропия, высокоэнтропийные инструментальные режущие материалы (ИРМ).

Keywords: cutting-tool materials, wear-resistance, thermal EMF, entropy, high entropy cutting-tool materials.

Введение. Важную роль в обеспечении эффективности металлообработки и надежности инструментальных наладок играет лезвийный режущий инструмент (РИ). В настоящее время эксплуатационные свойства твердых сплавов (ТС) и быстрорежущих сталей (БРС) оцениваются на основе экспериментальных данных, а при разработке новых составов учитываются в основном металлургические, технологические и экономические факторы. В этой связи важно прогнозировать свойства существующих и вновь разрабатываемых составов инструментальных режущих материалов (ИРМ), основываясь на изучении комплекса термодинамических процессов в зоне трения при резании и получении аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа.

На кафедре «Инструментальное производство» Донского государственного технического университета (ДГТУ) зависимость для оценки интенсивности изнашивания была получена исходя из уравнения баланса энтропии и предположения, что в износе инструмента при резании превалируют тепловые процессы [1–6]:

$$J = \frac{\lambda_1 \int_0^h \left(\frac{dT}{dx} \frac{1}{T} \right)^2 dx - \lambda_1 \int_0^h \frac{d^2T}{dx^2} \frac{1}{T} dx}{v \left(S_{298}^0 + \frac{1}{T} \int_{T298}^{T} CpdT \right)} \cdot K \quad (1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-01328/13).

** E-mail: ryzhkin.anatolia@yandex.ru, u_oley@mail.ru

*** The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 12-08-01328/13).

Здесь T — температура поверхности изнашиваемого материала; λ_1 — его теплопроводность; $\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры; S — энтропия; Cp — объемная теплоемкость.

Первый член числителя в формуле (1) — производство, а второй член — поток тепловой энтропии. Разница между ними — энтропия, накопленная в изнашиваемом материале. Коэффициент K учитывает долю энергии трения, затрачиваемой на образование и удаление частиц износа (в первом приближении этот коэффициент равен отношению температуры вспышки на пятнах фактического контакта к температуре поверхности).

Состав и свойства ЭТС. Данные многочисленных экспериментов позволяют утверждать, что интенсивность изнашивания материала будет тем меньше, чем больше его энтропия — S (находится в знаменателе формулы (1)). Были разработаны экспериментальные твердые сплавы с модифицированной кобальтовой связкой, в которых часть кобальта заменяется молибденом — 1-я группа; железом и медью — 2-я группа; молибденом и титаном — 3-я группа (табл. 1) [4, 7].

Таблица 1

Новые составы ТС и изменение их энтропии в зависимости от состава

№ п/п	Сплав	Состав, %		Энтропия, Дж/моль·гр.	Коэффициент повышения стойкости
		WC*, %	Связка		
1	2	3	4	5	6
1	2.1	91,69	8,31% [6,23% Co + 2,08% Mo]	35,25	1,8
2	2.2	91,4	8,6% [5,6% Co + 3% Mo]	35,22	1,7
3	2.3	90,28	[3,7% Co + 6,02% Mo]	34,95	Растрескивание
4	2.19	92,63	7,38% [1,52% Co + 5,03% Fe + 0,82% Cu]	35,08	1,4
5	2.20	92,38	7,62% [3,6% Co + 3,2% Fe + 0,82% Cu]	35,6	1,5
6	2.21	92,45	7,55% [5,4% Co + 1,43% Fe + 0,82% Cu]	35,16	1,9
7	2.22	91,95	8,05% [5,65% Co + 1,8% Mo + 0,6% Ti]	35,13	2,0
8	2.23	91,59	8,41% [5,1% Co + 2,7% Mo + 0,61% Ti]	35,09	1,8
9	2.24	90,62	9,38% [3,34% Co + 5,44% Mo + 0,67% Ti]	35,0	Растрескивание ≥1,0
10	ВК8 (по ТУ)	92	[7,5–8] %Co; не более 0,3% Fe; O_2 не более 0,5%	35,0	
*Карбид вольфрама.					

При обработке сталей 45 в условиях комбината твердых сплавов г. Владикавказа наибольшую стойкость при точении показали экспериментальные твердые сплавы (ЭТС) с содержанием молибдена не более 2 %, сплавы кобальт-железо-медь (железо не более 1,5 %) и со связкой кобальт-молибден-титан (молибден не более 2,5 %) (см. графу 6 табл. 1.). Оказалось, что стойкость этих сплавов в 1,5–1,9 раза выше, чем у сплава ВК8. Это согласуется с величинами их энтропий (см. графу 5 табл. 1), которые выше, чем у сплава ВК8 (рис. 1, кривая $K_и$ и ΔS^0_{298}).

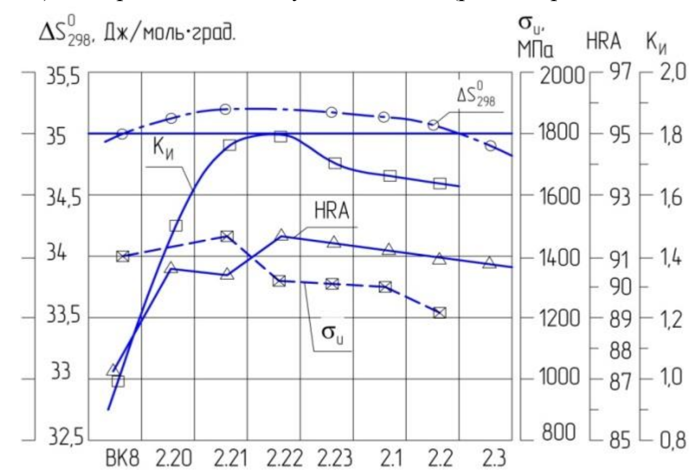


Рис. 1. Характеристики экспериментальных твердых сплавов с модифицированной кобальтовой связкой [4, 7]

Эти данные были проверены в лабораторных условиях на кафедре «Инструментальное производство» ДГТУ при продольном точении жаропрочной стали 12Х18Н10Т. Приняв в качестве критериального износ по задней поверхности $h_3 = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ м, на каждой скорости в выбранном диапазоне ($V = 0{,}5$; 0,83; 1,25; 1,66; 2,49 и 2,9 м/с) строили кривые износа h_3 от времени работы (рис. 2) [4].

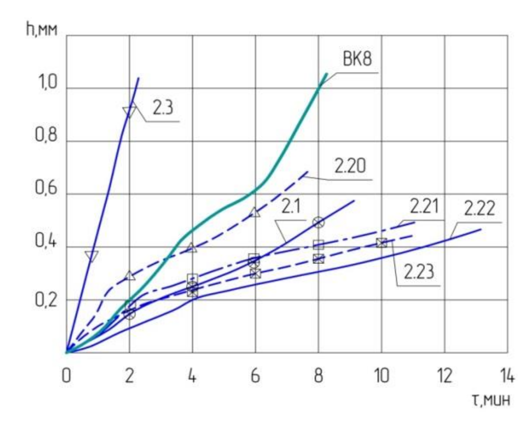


Рис. 2. Износ пластин из экспериментальных твердых сплавов при точении жаропрочной стали 12Х18Н10Т (u = 1,25 м/с; t = 0,5·10^{-3} м; s = 0,23·10^{-3} м/об.)

При этом сплавы 2.22, 2.20, 2.21 и 2.1 показали максимальную стойкость, в 2–2,5 раза превышающую стойкость пластин из ВК8, как и при точении стали 45 (см. табл. 1).

Сплавы 2.3 и 2.24, содержащие в связке более 5 % Mo, оказались неработоспособными из-за повышенной хрупкости. Сплав 2.3 во всем диапазоне скорости резания демонстрировал катастрофический износ через 1,5 минуты после начала резания.

Для всех составов ЭТС существует оптимальная скорость резания, при которой интенсивность изнашивания J минимальна (рис. 3).

Составы ЭТС (кроме 2.3 и 2.24) на оптимальных скоростях резания обнаруживают в 2,4–3,0 раза большую износостойкость, чем базовый сплав ВК8. На высоких скоростях резания (V > 2,5 м/с) сохраняется преимущество сплавов 2.22 и 2.23, а также сплавов 2.21 и 2.1. В зоне низких скоростей резания V = 0,5–0,8 м/с по сравнению с ВК8 сохраняется преимущество сплавов 2.1, 2.20, 2.22, 2.23 в силу меньшей склонности к схватыванию и проявлению адгезионного вида изнашивания, меньшему наростообразованию. Кроме этого, применение ЭТС с модифицированной кобальтовой связкой расширяет диапазон оптимальных скоростей резания (V_0 = 1,25 – 2,0 м/с) [4].

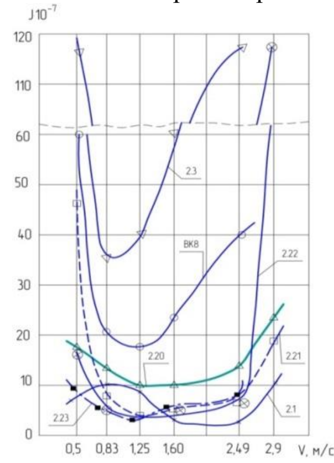


Рис. 3. Интенсивность изнашивания экспериментальных твердых сплавов при точении стали 12Х18Н10Т (V = 0,83 – 1,25 м/с; t = 0,5·10^{3} м; S = 0,23·10^{-3} м/об.)

Одной из причин повышенной износостойкости ЭТС может быть их высокая окалиностойкость при взаимодействии с кислородом воздуха. В табл. 2 приведены результаты экспериментов по окалиностойкости этих сплавов (графа 3) и интенсивность изнашивания (графа 4).

Таблица 2

Стойкость ЭТС против газовой коррозии [4]

Сплав	Привес образцов при нагреве, г		Интенсивность изнашивания, J·10^{-7} (V = 1,25 м/с)	Энтропия, S^0_{298}, Дж/моль · °С
	300 °С	500 °С		
1	2	3	4	5
ВК8	1·10^{-4}	23·10^{-3}	18,0	35,00
2.1	5·10^{-4}	1,7·10^{-3}	9,0	35,12
2.19	1·10^{-4}	1,1·10^{-3}	6,0	35,16
2.21	4·10^{-4}	1,0·10^{-3}	0,5	35,18
2.22	2·10^{-4}	0,6·10^{-3}	0,45	35,26

Свойства высокоэнтропийных БРС. К группе широко применяемых ИРМ относятся и БРС. Кроме энтропийного показателя они характеризуются еще и величиной абсолютной термо-ЭДС (E).

Из физики твердого тела известно фундаментальное соотношение связи между термо-ЭДС (E) и энтропией материала ΔS [8, 9]:

$$E = -\frac{\Delta H - T\Delta S}{Fn}, \qquad (2)$$

где F — постоянная Фарадея, n — число электронов, Т— абсолютная температура.

Из (2) видно, что большему значению энтропии материала соответствует меньшая термо-ЭДС.

Связь между E и S (2) была проверена на быстрорежущих сталях. В табл. 3 и на рис. 4 представлены результаты расчетных значений энтропий для разный марок быстрорежущих сталей и сравнение с величинами их относительных ЭДС (по отношению к платине).

Таблица 3

Физические и эксплуатационные характеристики БРС [4, 10]

Марка стали	Физические свойства		Трение	Сверление	
	Абсолютная термо-ЭДС, мкВ/ °С	Энтропия, S^0_{298}, Дж/моль · °С	Интенсивность изнашивания, $J \cdot 10^{-8}$	Стойкость*	
				T (0,5)	T (0,9)
Р18	15,2	28,04	2,5	144	66
Р12	–	27,67	2,0	–	–
Р6М5	15,0	27,26	3,0	178/163	82
Р6М4Ф4	13,5	27,46	2,5	245	68
Р4М4Ф4	8,7	27,3	–	102	68
10Р6М5	–	27,60	–	198	–
Р6М5К5	–	27,70	1,5	–	–
Р8М3Ф4	10,8	27,53	1,6	175	70
Р9Ф5	11,5	27,83	1,5	145	69
Р6Ф2К8М5	4,2	27,57	1,5	241	90
Р12Ф2К8М3	6,1	30,78	1,4	332	130
Р18Ф2К8	–	30,60	–	–	–
*В количестве отверстий.					

Из рис. 4 видно, что существует связь между энтропией ИРМ как термодинамической характеристикой и относительной (абсолютной) термо-ЭДС: большей энтропии соответствует меньшая абсолютная термо-ЭДС стали — ε.

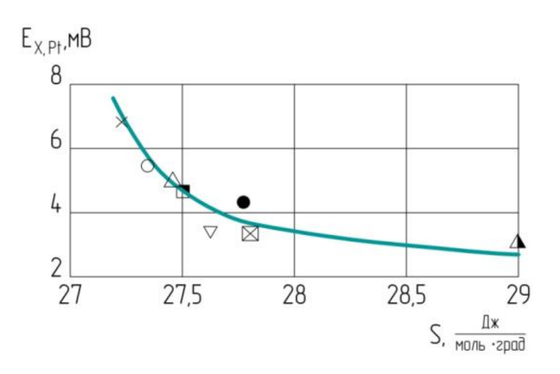


Рис. 4. Связь между энтропией и термо-ЭДС для быстрорежущих сталей разных марок (ГОСТ 19265-73): ▽ — Р6Ф2К8М5, ◭ — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18, △ — Р6М4Ф4, ✕ — Р6М5, ⊠ — Р6М5К5, ◪ — Р8М3Ф4, ● — Р9Ф5

Экспериментально установлена связь между износостойкостью быстрорежущих сталей при трении и резании (сверление) и термодинамическими характеристиками структуры — энтропии и термо-ЭДС (рис. 5). Наилучшие показатели продемонстрировали стали, имеющие минимальные значения термо-ЭДС.

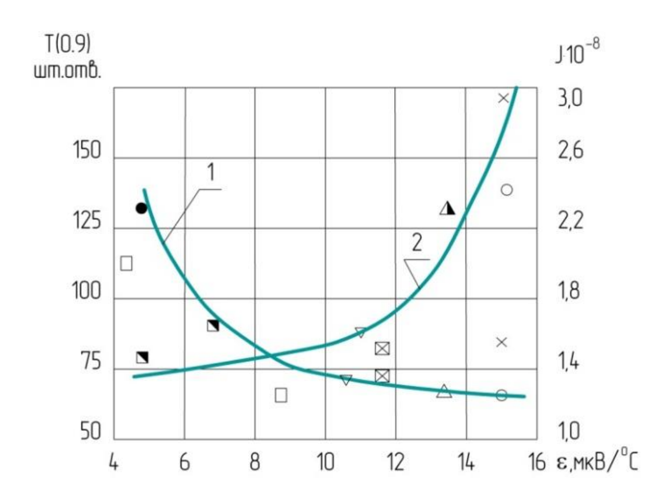


Рис. 5. Взаимосвязь абсолютной термо-ЭДС и интенсивности изнашивания БРС при трении (кривая 2) и гарантийной стойкости сверл при резании (кривая 1) для разных марок быстрорежущих сталей [10]: ◪ — Р6Ф2К8М5, ● — Р12Ф2К8М3, ○ — Р18, □ — Р4М4Ф4, △ — Р6М4Ф4, ✕ — Р6М5, ◭ — Р6М5К5, ▽ — Р8М3Ф4, ⊠ — Р9Ф5

Выводы.

1. Теоретическая оценка интенсивности изнашивания ИРМ как гетерогенных структур показала, что для снижения износа при трении и резании необходимо увеличивать энтропию или уменьшать абсолютную термо-ЭДС.

2. Для быстрорежущих сталей обнаружена функциональная взаимосвязь между структурными характеристиками материалов — абсолютной термо-ЭДС и энтропией.

3. В качестве параметра, характеризующего работоспособность ИРМ в условиях резания, целесообразно использовать его энтропию, так как этот параметр поддается расчету при известном химическом составе ИРМ. При «конструировании» ИРМ следует повышать энтропию варьированием состава.

Библиографический список

1. Термодинамический метод оценки интенсивности изнашивания трущихся материалов / А. А. Рыжкин [и др.] // Трение и износ. — 1982. — Т. 3, № 5. — С. 867–872.

2. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: физические основы / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1996. — 242 с.

3. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 1995. — 256 с.

4. Оценка работоспособности высокоэнтропийных инструментальных режущих материалов / А. А. Рыжкин [и др.] // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 1. — С. 47–54.

5. Ryshkin A. Über Reibung und Verschleiss bei der Zerspanung mit W-Co und W-frei beschichteten Schneidwerkzeugen / A. Ryshkin // 14th International Plansee Seminar'97 : Proceedings. — Reutte, Tirol, Wattens. — 1997. — Vol. 2. Cemented Carbides and Hard Materials. — P. 300–314.

6. Рыжкин, А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект) / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 322 с.

7. Твердый сплав на основе карбида вольфрама (варианты) : патент 2531332 Рос. Федерация : МПК C22C29/08 / А. А. Рыжкин [и др.] ; Донской государственных технический университет. — 2012128284/02 ; заявл. 04.07.12 ; опубл. 20.10.14, Бюл. № 29. — 6 с.

8. Термоэлектродвижущая сила металлов / Ф.-Дж. Блатт [и др.] ; пер. с англ. под ред. Д. К. Белащенко. — Москва : Материал, 1980. — 248 с.

9. Карапетьянц, М. Х. Введение в теорию химических процессов / М. Х. Карапетьянц. — Москва : Высшая школа, 1975. — 333 с.

10. Рыжкин, А. А. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов / А. А. Рыжкин, В. В. Илясов // Вестник машиностроения. — 2000. — № 12. — С. 32–40.

References

1. Ryzhkin, A.A., et al. Termodinamicheskiy metod otsenki intensivnosti iznashivaniya trushchikhsya materialov. [Thermodynamic method for estimating wear rate of rubbing materials.] Journal of Friction and Wear, 1982, vol. 3, no. 5, pp. 867–872 (in Russian).

2. Ryzhkin, A.A. Obrabotka materialov rezaniem: fizicheskie osnovy. [Materials cutting: physical fundamentals.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1996, 242 p. (in Russian).

3. Ryzhkin, A.A. Obrabotka materialov rezaniem. [Materials cutting.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 1995, 256 p. (in Russian).

4. Ryzhkin, A.A., et al. Otsenka rabotosposobnosti vysokoentropiynykh instrumental'nykh rezhushchikh materialov. [Determination of the efficiency of high-entropy cutting tool materials.] Journal of Friction and Wear, 2016, vol. 37, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).

5. Ryshkin, A. Über Reibung und Verschleiss bei der Zerspanung mit W-Co und W-frei beschichteten Schneidwerkzeugen. 14th International Plansee Seminar'97: Proceedings. Reutte, Tirol, Wattens, 1997, vol. 2. Cemented Carbides and Hard Materials. Pp. 300–314.

6. Ryzhkin, A.A. Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskiy aspekt). [Synergetics of cutting tool materials wear (triboelectric aspect).] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2004, 322 p. (in Russian).

7. Ryzhkin, A.A., et al. Tverdyy splav na osnove karbida vol'frama (varianty): patent 2531332 Ros. Federatsiya: MPK S22S29/08. [Solid carbide based on tungsten carbide (options).] Patent RF, no. 2531332, 2014 (in Russian).

8. Blatt, F.-J., et al. Termoelektrodvizhushchaya sila metallov. [Thermoelectric power of metals.] Transl. from English. Moscow: Material, 1980, 248 p. (in Russian).

9. Karapetyants, M.K. Vvedenie v teoriyu khimicheskikh protsessov [Introduction to chemical processes theory.] Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 333 p. (in Russian).

10. Ryzhkin, A.A., Ilyasov, V.V. O svyazi mezhdu iznosostoykost'yu i fizicheskimi svoystvami instrumental'nykh materialov . [On the relationship between wear resistance and physical properties of the tool materials.] Vestnik Mashinostroeniya, 2000, no. 12, pp. 32–40 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.04.2016
Сдана в редакцию 08.04.2016
Запланирована в номер 07.07.2016